

## Оглавление

Введение.....	5
1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ .....	5
2. ГИДРОСТАТИКА .....	10
3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГИДРОДИНАМИКИ. ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ .....	14
4. УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ.....	18
5. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ .....	22
6. РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ. ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА .....	29
7. ФОРМУЛА ДАРСИ — ВЕЙСБАХА. ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ ПО ДЛИНЕ .....	32
8. МЕСТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ .....	35
9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБНЫХ СИСТЕМ .....	43
10. ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ГАЗОВЫХ ТРУБНЫХ СИСТЕМ.....	49
Библиографический список .....	51
Приложения .....	52

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач таких инженерных систем, как системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, газо-, тепло-, водоснабжения и водоотведения, является транспортировка жидкостей и газов. При проектировании инженерных систем обязательный этап — гидравлический или аэродинамический расчет, в ходе которого выбирают размеры труб, транспортирующих жидкостей, определяют потери давления в системе, вычисляют величину расхода жидкостей на ответвлениях, прогнозируют формирование приточных струй. Основой данного расчета выступают теоретические знания и практические умения использования основных законов механики жидкости, гидрогазостатики и гидрогазодинамики.

Цель учебно-методического пособия — закрепить знания, полученные при изучении дисциплины «Гидравлика», и применить их в прикладных задачах по расчету инженерных систем.

В работе содержится теоретическая информация, необходимая для проведения основных гидравлических расчетов инженерных систем. В каждой главе подробно рассмотрены и решены две прикладные задачи.

При освоении материала и для решения задач необходимо использовать информацию из предыдущих глав.

## 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Жидкость — физическое тело, которое легко изменяет свою форму под действием самых незначительных сил, обладает свойством текучести, т.е. большой подвижностью частиц, и поэтому принимает форму сосуда, в котором оно находится.

По механическим свойствам жидкости разделяют на два класса: *малосжимаемые (капельные)*, отличающиеся тем, что в малых количествах принимают сферическую форму, а в больших — образуют свободную поверхность, и *сжимаемые (газообразные)*, способные к значительному уменьшению своего объема под действием давления и к неограниченному расширению при отсутствии давления.

Стоит отметить, что в гидравлике не заостряют внимание на молекулярном строении вещества, а принимают жидкость как непрерывную, или сплошную, среду, которая заполняет все пространство. То есть принимается, что физические свойства вещества распределяются и изменяются в занимаемом пространстве непрерывно.

Жидкость и газы характеризуются определенными физическими свойствами, важнейшими из которых с точки зрения применения их в инженерных системах теплогазоснабжения, вентиляции, водоснабжения и водоотведения являются:

- удельный вес;
- плотность;
- сжимаемость;
- вязкость.

Удельным весом жидкости  $\gamma$ , Н/м<sup>3</sup>, называется вес единицы ее объема:

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (1.1)$$

где  $G$  — вес жидкости, Н;  $V$  — объем, занимаемый ею, м<sup>3</sup>.

Например, вода при температуре 4 °С имеет удельный вес 9810 Н/м<sup>3</sup>.

Плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, называется масса жидкости, заключенная в единице объема, или отношение массы жидкости к ее объему:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.2)$$

где  $m$  — масса жидкости, кг;  $V$  — объем, занимаемый ею, м<sup>3</sup>.

Например, вода при температуре 4 °С имеет плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Между плотностью и удельным весом существует связь, которая находится при учете зависимости между весом тела  $G$ , его массой  $m$  и ускорением свободного падения  $g$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g}. \quad (1.3)$$

Плотность и удельный вес зависят от давления и температуры, причем эта зависимость различна для капельных и газообразных жидкостей.

*Сжимаемость* капельных жидкостей под действием давления характеризуется *коэффициентом объемной сжимаемости*  $\beta_V$ ,  $\text{Па}^{-1}$ , который представляет собой относительное изменение объема, приходящееся на единицу изменения давления:

$$\beta_V = \frac{V_1 - V_2}{V_1(p_2 - p_1)}, \quad (1.4)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — начальный и конечный объемы жидкости соответственно,  $\text{м}^3$ ;  $p_1$  и  $p_2$  — начальное и конечное давления соответственно,  $\text{Па}$ .

Изменение объема жидкости в зависимости от изменения температуры характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения  $\beta_t$ ,  $\text{K}^{-1}$  ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ):

$$\beta_t = \frac{V_2 - V_1}{V_1(t_2 - t_1)}, \quad (1.5)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — начальный и конечный объемы жидкости соответственно,  $\text{м}^3$ ;  $t_1$  и  $t_2$  — начальная и конечная температуры жидкости соответственно,  $\text{K}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

В среднем для воды  $\beta_V = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ , а  $\beta_t = 0,00015 \text{ K}^{-1}$ .

Несмотря на малое значение температурного коэффициента объемного расширения, его учет необходим, например, при проектировании водяных систем отопления, так как температура теплоносителя-воды в процессе эксплуатации системы будет изменяться в значительном диапазоне.

Вследствие большой сжимаемости газов их плотность и удельный вес в значительной степени зависят от давления и температуры. Процессы сжатия и расширения газов подчиняются известным из термодинамики законам Бойля — Мариотта и Гей-Люссака для идеальных газов.

Закон Бойля — Мариотта выражается зависимостью

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}, \quad (1.6)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — объемы газа,  $\text{м}^3$ , при постоянной температуре, соответственно при давлении  $p_1$  и  $p_2$ ,  $\text{Па}$ .

Закон Гей-Люссака устанавливает связь между объемом и температурой газа при постоянном давлении и характеризуется уравнением

$$V_1 / V_2 = T_1 / T_2 = \text{const}, \quad (1.7)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — абсолютные температуры,  $\text{K}$ .

*Вязкость* — свойство жидкости оказывать сопротивление растягивающим и сдвигающим силам. Данное свойство вызвано силой трения между слоями жидкости, движущимися с разными скоростями.

Рассмотрим случай движения жидкости параллельными слоями (рис. 1.1). Пусть скорость движения отдельного слоя  $A$  равна  $u$ , а скорость движения соседнего слоя  $B$  больше на  $\Delta u$ . Величина  $\Delta u$  выражает собой абсолютный сдвиг слоя  $B$  по слою  $A$  за единицу времени. При скольжении одного слоя по другому между ними возникает сила трения. Относя эту силу к единице площади трения, получим касательное напряжение или напряжение силы трения  $\tau$ .

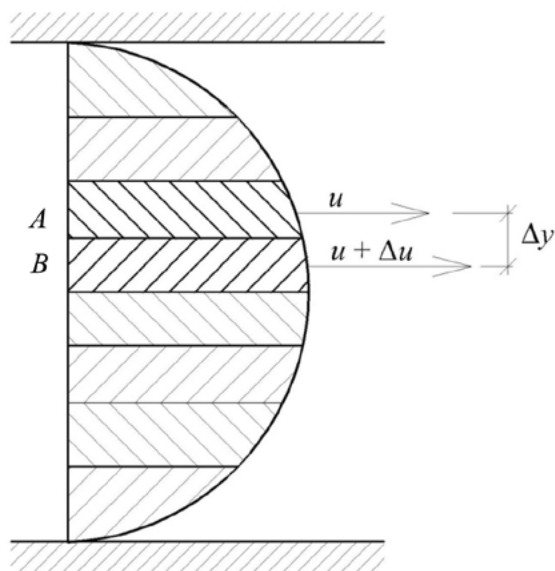


Рис. 1.1. Схема к определению понятия вязкости жидкости

Теоретические предположения, высказанные Ньютоном (1723) и затем экспериментально подтвержденные Николаем Павловичем Петровым (1884), устанавливают, что сила трения не зависит от давления жидкости, а пропорциональна поверхности соприкосновения слоев, скорости  $\Delta u$  и обратно пропорциональна расстоянию между слоями  $\Delta y$ .

Если силу трения отнести к единице площади, то получится значение так называемого касательного натяжения  $\tau$ :

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}, \quad (1.8)$$

где  $\mu$  — коэффициент пропорциональности, называемый *динамической*, или *абсолютной*, *вязкостью*, Па·с.

Наряду с динамической вязкостью, при практических расчетах применяют так называемую *кинематическую вязкость*  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, представляющую собой отношение динамической вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.9)$$

Стоит отметить, что вязкость капельных жидкостей уменьшается с увеличением температуры, а вязкость газов, наоборот, возрастает. Объясняется это различием самой природы вязкости в жидкостях и газах. В жидкостях молекулы расположены гораздо ближе друг к другу, чем в газах, и вязкость вызывается силами молекулярного сцепления. Эти силы с увеличением температуры уменьшаются, поэтому падает вязкость. В газах же вязкость обусловлена главным образом беспорядочным тепловым движением молекул, интенсивность которого увеличивается с ростом температуры, поэтому вязкость газов с увеличением температуры возрастает.

Таким образом, коэффициент кинематической вязкости зависит от природы жидкости и от температуры.

Однако отметим, что вязкость жидкости может зависеть и от давления, но эта зависимость проявляется лишь при достаточно большом значении давления. В инженерных системах давление ограничено, как правило, 25 МПа (максимальное рабочее давление труб и оборудования), а в этом диапазоне вязкость жидкости практически не изменяется от давления.

Для упрощения решения некоторых инженерных задач жидкость иногда принимают *невязкой* (*идеальной*). Под идеальной жидкостью понимают некую воображаемую жидкость, обладающую абсолютной подвижностью, т.е. лишенную вязкости, а также абсолютно несжимаемую, не расширяющуюся с изменением температуры. Полученные результаты приходится, как правило, корректировать, вводя поправочные коэффициенты.

Отдельно стоит рассмотреть вопрос *кипения* и *испарения* жидкостей. Переход жидкости в пар называется *испарением*, обратный переход — *конденсацией*.

Важно, что жидкость и ее пар могут находиться в равновесии, т.е. количество молекул, переходящих из состояния жидкости в пар, равно количеству молекул, переходящих из состояния пара в жидкость. В таком случае пар называют *насыщенным* и в нем устанавливается давление, называемое *давлением насыщения водяных паров*.

Вообще жидкость может испаряться как со свободной поверхности, так и внутри пузырей, образующихся при определенной температуре и давлении. Такой процесс называется *кипением*.

В табл. 1.1 приведена температура кипения воды при различном давлении насыщения.

Таблица 1.1

#### Основные физические свойства воздуха

$P_{\text{нас}}$ , кПа	12,344	101,32 (атм. давление)	169,02	270,02	475,72
$t_{\text{кип}}$ , °C	50	100	115	130	150

В инженерной практике часто сталкиваются с понятием «кавитация» — частным случаем кипения, который возникает в движущейся жидкости вследствие местных понижений давления до давления насыщенного пара. Часто процесс кавитации происходит в насосных установках или регулирующей или дросселирующей арматуре, где в связи с резким понижением давления возможно кипение жидкости. Сама кавитация в инженерных системах может проявляться как в виде отдельных пузырьков, возникающих в местах пониженного давления и уносимых потоком (пузырьковая перемещающаяся кавитация), так и в виде сплошных, заполненных парами жидкости полостей, присоединенных к поверхности обтекаемых тел (суперкавитация).

Процесс кавитации разрушителен для оборудования инженерных систем (рис. 1.2), поэтому принимают различные меры для его недопущения.



Рис. 1.2. Разрушение лопастного насоса из-за процесса кавитации

При расчетах инженерных систем жидкость обычно представляется сплошной (непрерывной) средой. Однако в некоторых системах возможно нарушение сплошности жидкости, представленное *многофазными* системами, т.е. системами, состоящими из нескольких фаз.

В инженерных системах среди многофазных систем преобладают двухфазные. Например: вода — твердые частицы (системы водоотведения); газ — твердые частицы (пылеулавливание, пневмотранспорт); газ — капли жидкости (сушильные камеры, увлажнители воздуха вентиляционных установок); газ — газ (камеры парового увлажнения); жидкость — пузырьки газа (примеси воздуха в воде систем водоснабжения и водяного теплоснабжения); жидкость — жидкость (антифризы — растворы воды и гликолей в системах отопления). Во всех примерах первую из указан-

ных фаз условно называют непрерывной, а вторую — дискретной. Количество второй (дискретной) фазы в непрерывной определяется *концентрацией*. Различают объемную  $C_V$  и массовую  $C_m$  концентрацию фазы, которая является отношением соответственно объема или массы фазы к общему объему или массе системы:

$$C_{V2} = \frac{V_2}{V_1 + V_2}; \quad (1.10)$$

$$C_{m2} = \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (1.11)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — объем двух фаз системы,  $\text{м}^3$ ;  $m_1$  и  $m_2$  — масса двух фаз системы, кг.

Понятие концентрации позволяет определить основные параметры многофазной системы. Например, средняя плотность многофазной системы,  $\text{кг/м}^3$ , может быть определена по формуле

$$\rho = \rho_1 C_{V1} + \rho_2 C_{V2} = \rho_1 (1 - C_{V2}) + \rho_2 C_{V2}. \quad (1.12)$$

**Пример 1.1.** Максимальная температура жидкости в контуре может достигать  $95^\circ\text{C}$ . Начальный объем жидкости в системе при его температуре  $5^\circ\text{C}$  составляет 600 л.

Необходимо определить необходимый полезный объем расширительного бака гидравлического контура.

**Решение.** Согласно определению температурного коэффициента объемного расширения

$$\beta_t = \frac{V_2 - V_1}{V_1(t_2 - t_1)}, ^\circ\text{C}^{-1}.$$

Задачей расширительного бака является вбирать в себя излишки объема жидкости при ее нагреве или восполнять недостатки объема жидкости при ее охлаждении в процессе эксплуатации замкнутых контуров инженерных систем. Тогда полезный объем расширительного бака  $\Delta V$ , л, может быть определен по формуле

$$\Delta V = V_2 - V_1,$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  — объемы жидкости при температуре  $t_1$  и  $t_2$  соответственно, л.

Следовательно,

$$\Delta V = \beta_t V_1 (t_2 - t_1),$$

где  $\beta_t$  — температурный коэффициент объемного расширения, определяемый по табл. А.1 прил. А при средней температуре  $50^\circ\text{C}$ ,  $\beta_t = 0,000422^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$$\Delta V = 0,000422 \cdot 600(95 - 5) = 22,8 \text{ л.}$$

*Ответ:* 22,8 л.

**Пример 1.2.** К  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  дистиллированной воды с температурой  $20^\circ\text{C}$  добавили  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  этиленгликоля с температурой  $15^\circ\text{C}$ .

Необходимо определить среднюю плотность и динамическую вязкость смеси.

**Решение.** Согласно понятию объемной концентрации, концентрация этиленгликоля  $C_{V2}$  в смеси составит

$$C_{V2} = \frac{V_2}{V_1 + V_2} = \frac{1}{5 + 1} = 0,167 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где  $V_1$  и  $V_2$  — объем воды и этиленгликоля соответственно,  $\text{м}^3$ .

Тогда средняя плотность смеси может быть определена по формуле

$$\rho = \rho_1 (1 - C_{V2}) + \rho_2 C_{V2} = 998,2(1 - 0,167) + 1119,6 \cdot 0,167 = 1018,5 \text{ кг/м}^3,$$

где  $\rho_1$  — плотность пресной воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ , согласно табл. А.1 прил. А,  $\rho_1 = 998,2 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_2$  — плотность этиленгликоля при температуре  $15^\circ\text{C}$ , согласно табл. А.2 прил. А,  $\rho_2 = 1119,6 \text{ кг/м}^3$ .

Средняя динамическая вязкость смеси может быть определена по формуле

$$\mu = \mu_1(1 - C_{V_2}) + \mu_2 C_{V_2} = 1001,5 \cdot 10^{-6}(1 - 0,167) + 35189 \cdot 10^{-6} \cdot 0,167 = 6711 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

где  $\mu_1$  — динамическая вязкость пресной воды при температуре 20 °С, согласно табл. А.1 прил. А,  $\mu_1 = 1001,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_2$  — динамическая вязкость этиленгликоля при температуре 15 °С, согласно табл. А.2 прил. А,  $\mu_2 = 35189 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Ответ: 1018,5 кг/м<sup>3</sup> и 6711 · 10<sup>-6</sup> Па·с.

## 2. ГИДРОСТАТИКА

На любую жидкость и внутри нее могут действовать различные силы: непрерывно *распределенные по всему объему (массе)* жидкости, непрерывно *распределенные по площади*.

Силы, непрерывно распределенные по всему объему (массе) жидкости, называют *массовыми* (или *объемными*). К таким силам относятся сила тяжести жидкости, сила инерции движущейся жидкости и центробежные силы. Массовые силы пропорциональны массе жидкости и для однородных жидкостей пропорциональны его объему.

Силы, распределенные по площади, принято называть *поверхностными*. Поверхностные силы непрерывно распределены по поверхности жидкости и пропорциональны величине этой поверхности (при равномерном их распределении). Данные силы возникают из-за непосредственного воздействия на жидкость другого тела: твердого (например, поршня, стенки трубы) или жидкого (смешение потоков жидкости или взаимное давление слоев жидкости разной плотности), а также газа (давление газовой среды на жидкость в расширительных емкостях).

Рассмотрим пример (рис. 2.1).

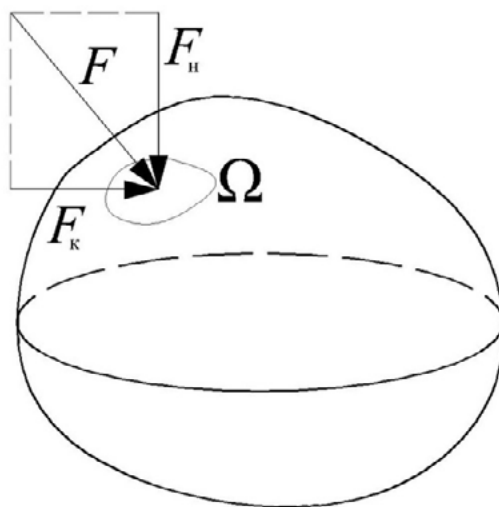


Рис. 2.1. Поверхностные силы

В общем случае некая поверхностная сила  $F$ , Н, действующая на площадку площадью  $\Omega$ , м<sup>2</sup>, направлена под некоторым углом к ней. Данную силу можно разложить на нормальную  $F_n$  и касательную  $F_k$  составляющие. Нормальная сила направлена внутрь объема (перпендикулярно рассматриваемой площадке) и называется *силой давления*. Касательная сила направлена вдоль поверхности и называется *силой трения*.

В классической гидромеханике массовые и поверхностные силы рассматриваются в виде *единичных*, т.е. отнесенных к какой-то единице. Массовые соответственно относятся к единице массы, а поверхностные — к единице площади. Из курса физики известно, что **массовые силы есть произведение массы тела на ускорение**, тогда единичная массовая сила будет численно равна ускорению. Единичную поверхностную силу называют *напряжением поверхностной силы*, причем ее раскладывают также на *нормальное* и *касательное напряжения*.

Если сила давления (нормальная поверхностная сила) равномерно распределена по площади рассматриваемой площадки, то нормальное напряжение можно определить по формуле

$$p = \frac{F_n}{\Omega}, \text{ Па.} \quad (2.1)$$

В любых покоящихся жидкости и газе касательные напряжения в любой произвольной точке равны нулю, а нормальные присутствуют и вызваны давлением верхних слоев жидкости на нижние. Данные напряжения являются сжимающими, так как жидкости и газы не сопротивляются растягивающим усилиям. Величина, равная модулю напряжения, в гидромеханике называется *гидростатическим давлением в точке*  $p_{\text{стат}}$ , Па.

Поверхность, в каждой точке которой значение гидростатического давления одинаково, называется *поверхностью уровня*. Поверхности уровня обладают двумя основными свойствами:

- 1) они не пересекаются между собой;
- 2) внешние массовые силы направлены по внутренней нормали к поверхности уровня.

При равновесии жидкости и ее состоянии покоя массовой силой является сила тяжести, а ускорением — ускорение свободного падения. Таким образом, поверхностью уровня (часто называют поверхностью равного давления) в однородной покоящейся жидкости будет любая горизонтальная, в том числе и свободная, поверхность, независимо от формы сосуда или водоема.

В инженерных системах понятие и свойства поверхности уровня и, в частности свободной поверхности, имеют важнейшее значение. Примером свободных поверхностей являются поверхности воды в открытых расширительных баках системы отопления или накопительных емкостей системы водоснабжения (в том числе водонапорные башни).

Закон распределения гидростатического давления в покоящейся жидкости выражается основным уравнением гидростатики:

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const}, \quad (2.2)$$

где  $z$  — отметка уровня, отсчитываемая от некоторой горизонтальной плоскости, м;  $p$  — давление, оказываемое на поверхность уровня, Па;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Часто на практике для наглядного определения давления во всех точках инженерной системы строят эпюру давления. Для построения эпюры давления и определения гидростатического давления  $p_{\text{стат}}$ , Па, в любой точке системы часто используют следующую форму уравнения:

$$p_{\text{стат}} = z\rho g + p. \quad (2.3)$$

При этом в каждой точке открытой поверхности давление принимают постоянным —  $p = p_0$  — и называют его внешним давлением, или давлением на поверхность;  $z$  обозначают как  $h$ , т.е. как высоту рассматриваемой плоскости от плоскости отсчета, а  $p_{\text{стат}}$  называют полным гидростатическим давлением. Тогда получим

$$p_{\text{стат}} = \rho gh + p_0. \quad (2.4)$$

Из уравнения видно, что величина первого слагаемого при постоянной плотности зависит только от глубины погружения рассматриваемой точки. Величина второго слагаемого при этом передается во все точки покоящейся жидкости по всем направлениям без изменения. В классической гидростатике такая величина называется *избыточным давлением*, однако в инженерных системах избыточным (манометрическим) давлением принято называть *разницу абсолютного и атмосферного давлений*. Подробно для подвижной жидкости данные понятия будут рассмотрены в разделе гидродинамики.

Атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре 0 °С, называется *нормальным*. При расчете инженерных систем атмосферное давление либо определяется для конкретного региона, либо принимается равным 101325 Па, как при нормальных условиях.



В отличие от несжимаемой (капельной) жидкости плотность газа есть величина переменная, зависящая от состояния газа. Таким образом, изменение давления в газе будет зависеть не только от координаты ( $z$  или  $h$ ), но и от того, как связаны между собой давление, плотность и температура газа. Эта связь устанавливается на основании уравнения газового состояния:

$$p = f(\rho; T), \quad (2.5)$$

где  $T$  — абсолютная температура газа в рассматриваемой точке, К.

В однородной атмосфере  $\rho = \text{const}$ , поэтому распределение давления в ней не отличается от распределения давления в покоящейся капельной жидкости.

В случае изотермического состояния газа его плотность меняется в соответствии с уравнением газового состояния Клапейрона:

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (2.6)$$

где  $R$  — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

После подстановки уравнения газового состояния в основное уравнение гидростатики и ряда преобразований можно получить зависимость

$$p = p_0 e^{-\frac{gh}{RT}}, \quad (2.7)$$

где  $p_0$  — давление в отсчитываемой плоскости (ниже плоскости, для которой определяется давление), Па;  $e$  — основание натурального логарифма,  $e = 2,71828$ .

Уравнение показывает, что при изотермическом состоянии давления в покоящемся газе давление меняется по экспоненциальному закону, уменьшаясь с увеличением высоты рассматриваемой точки.

**Пример 2.1.** В открытой накопительной емкости находится вода с температурой 65 °С. Емкость представляет собой цилиндрический бак с внутренними размерами 0,8×2 ( $d \times h$ ) м. Вода заполняет бак на уровне 1,5 м от дна.

Необходимо определить гидростатическое давление в нижней точке емкости. Как изменится давление, если охладить воду до 15 °С? Атмосферное давление принять, как при нормальных условиях, равным 101325 Па.

**Решение.** Согласно основному уравнению гидростатики

$$p_{\text{стат}} = \rho gh + p_0.$$

Поскольку емкость открытая, значит, верхняя поверхность жидкости соприкасается с атмосферной, и данная поверхность является поверхностью уровня. Очевидно, давление на поверхность равно атмосферному, т.е.  $p_0 = p_{\text{атм}}$ .

Плотность жидкости  $\rho$  определяется по справочным данным (см. табл. А.1 прил. А). При температуре 65 °С плотность воды составляет 980,5 кг/м<sup>3</sup>. Тогда гидростатическое давление в нижней части емкости до охлаждения составляет

$$p_{\text{стат}} = \rho gh + p_0 = 980,5 \cdot 9,81 \cdot 1,5 + 101325 = 115753 \text{ Па} = 115,8 \text{ кПа}.$$

После охлаждения воды изменятся ее плотность и объем, а значит, и высота водяного столба. Однако площадь поверхности, на которую оказывается давление, и масса жидкости остаются постоянными. Поэтому гидростатическое давление остается неизменным.

*Ответ:* 115,8 кПа. Не изменится.

**Пример 2.2.** Необходимо определить максимальное гидростатическое давление в гидравлическом контуре с открытой емкостью (рис. 2.2). Построить эпюру давления, если  $h_1 = 2$  м,  $h_2 = 10$  м, а температура воды в контуре 40 °С. Атмосферное давления принять, как при нормальных условиях, равным 101325 Па.

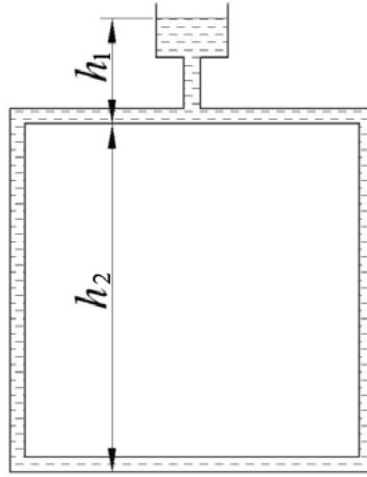


Рис. 2.2. Гидравлический контур к примеру 2.2

**Решение.** Максимальное гидростатическое давление будет наблюдаться в самой нижней точке системы, так как в ней самое высокое давление столба жидкости. В такой системе за отсчетную плоскость берется поверхность уровня, в которой известно давление. Такой поверхностью будет являться открытая поверхность жидкости в емкости, на которую оказывается давление  $p_0 = p_{\text{атм}}$ . Таким образом, давление в нижней точке системы (плоскость 1–1) согласно основному уравнению гидростатики составит

$$p_{\text{стат}}^{1-1} = \rho g h_{1-1} + p_{\text{атм}}.$$

Плотность жидкости  $\rho$  определяется по справочным данным (см. табл. А.1 прил. А). При температуре 40 °С, плотность воды 992,2 кг/м<sup>3</sup>.

$$p_{\text{стат}}^{1-1} = \rho g h_{1-1} + p_{\text{атм}} = 992,2 \cdot 9,81(10 + 2) + 101325 = 218127 \text{ Па} = 218,1 \text{ кПа}.$$

Давление в плоскости 2–2 составит

$$p_{\text{стат}}^{2-2} = \rho g h_{2-2} + p_{\text{атм}} = 992,2 \cdot 9,81 \cdot 2 + 101325 = 120792 \text{ Па} = 120,8 \text{ кПа}.$$

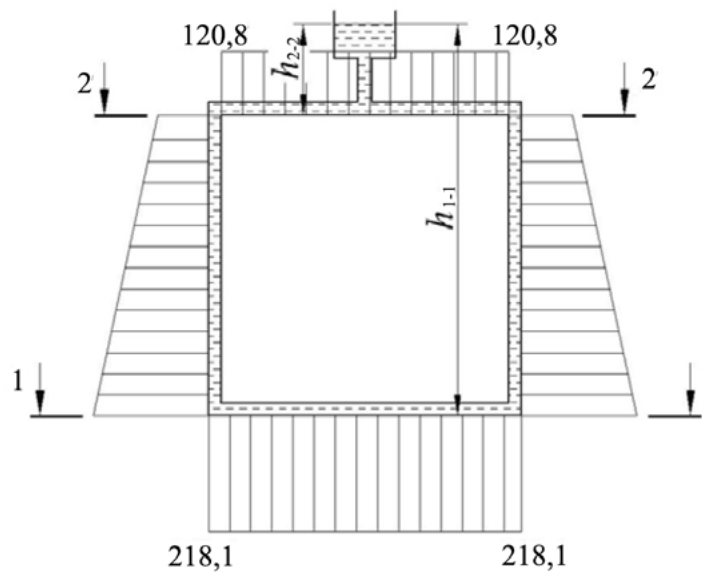


Рис. 2.3. Эпюра давления к примеру 2.2

**Ответ:** 218,1 кПа. По результатам расчета построена эпюра давления в гидравлическом контуре (рис. 2.3).

### 3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГИДРОДИНАМИКИ. ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

*Гидродинамика* — раздел гидравлики, изучающий законы движения жидкости, а также взаимодействия между жидкостью и твердыми телами при их относительном движении.

При проектировании и эксплуатации инженерных систем отопления, вентиляции и водоснабжения гидродинамика является основным разделом гидравлики. Жидкости и газы в данных системах, как правило, непрерывно перемещаются (за исключением нештатных ситуаций, застойных зон и накопительных емкостей) и взаимодействуют с различными твердыми телами или элементами каналов и труб, внутри которых движутся.

Жидкость может двигаться под действием **сил тяжести, внешнего давления и инерционных сил.**

К гидродинамическим характеристикам потока относят гидродинамическое давление и скорость движения жидкости.

*Гидродинамическое давление*  $p$ , Па — внутреннее давление, развивающееся при движении жидкости. *Скорость движения жидкости в данной точке*  $u$ , м/с, называется скоростью перемещения в пространстве частицы жидкости, находящейся в данной точке.

Движение жидкости может быть установившимся, неуставившимся и квазистационарным.

*Установившимся* называется такое движение, при котором скорость и давление в любой точке пространства, занятого жидкостью, не изменяются с течением времени, т.е. зависят только от координат точки. Аналитически это условие запишется так:

$$u = f_1(x, y, z) \text{ и } p = f_2(x, y, z).$$

*Неустановившимся* называется движение, при котором скорость и давление в любой точке пространства, занятого жидкостью, изменяются с течением времени. Аналитически это условие запишется так:

$$u = f_1(x, y, z, t) \text{ и } p = f_2(x, y, z, t).$$

*Квазистационарным* называется движение, при котором изменение температуры или давления в течение выбранного промежутка времени не является существенным, т.е. влияние изменения лежит в пределах допускаемой точности для решаемой задачи, и его можно рассматривать как установившееся.

В системах отопления и вентиляции с постоянным гидравлическим и аэродинамическим режимом работы движение жидкости или газа принято условно считать *квазистационарным*. Однако в системах отопления и вентиляции с переменным режимом работы, а также в системе водоснабжения расход жидкости или газа переменен, а значит, движение жидкости будет *неустановившимся*.

Для изучения законов движения жидкости вводят понятия о траектории, линии тока и элементарной струйке.

*Траекторией* движения частицы жидкости называется ее путь с течением времени. На рис. 3.1 показано положение частицы в разные моменты времени.

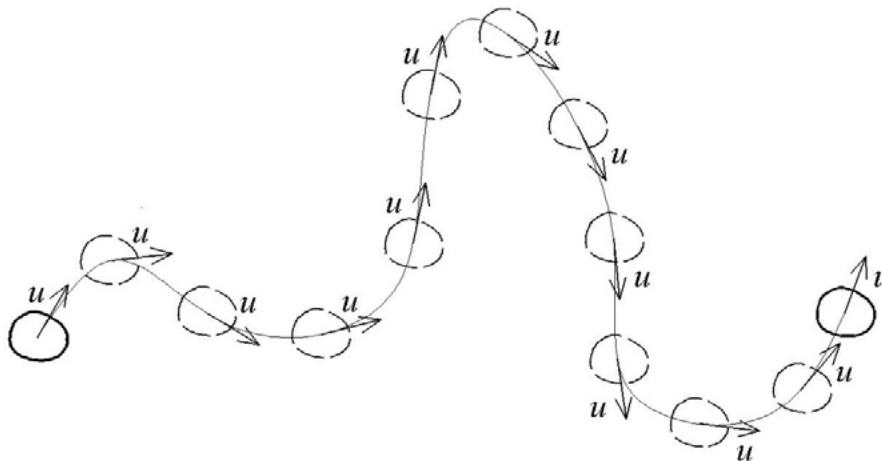


Рис. 3.1. Траектория движения частицы жидкости

Уравнение траектории движения частицы имеет вид

$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z},$$

где  $dx, dy, dz$  — проекции перемещения частицы на осях координат, м;  $u_x, u_y, u_z$  — проекции скорости частицы на осях координат, м/с.

*Линией тока* называется такая линия в движущейся жидкости, касательные к которой в любой ее точке совпадают с направлением векторов скорости частиц, расположенных на этой линии в данный момент времени (рис. 3.2).

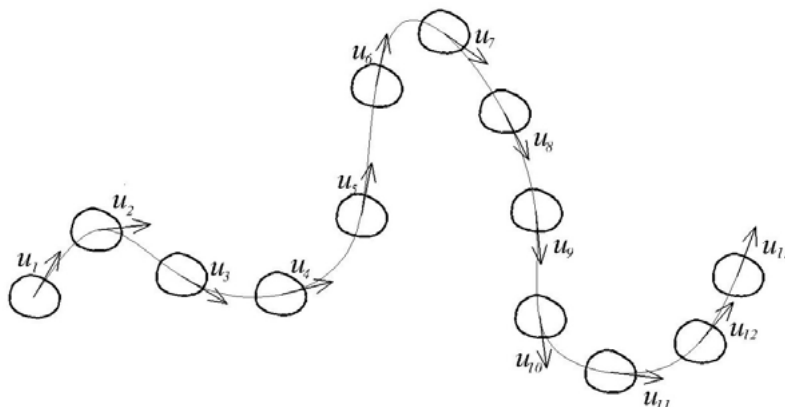


Рис. 3.2. Линия тока

Необходимо различать траекторию частицы и линию тока. *Траектория* относится лишь к определенной частице жидкости и представляет собой линию, описанную последовательным положением этой частицы с течением времени. *Линия тока* связывает между собой различные лежащие на ней частицы и характеризует направление их движения в данный момент времени.

В условиях установившегося течения линия тока и траектория могут совпадать и не изменять форму с течением времени. При неустановившемся движении линия тока и траектория движения жидкости не совпадают.

Кроме линий тока и траекторий иногда используют понятие *линии отмеченных частиц*. Так называют линию, на которой в данный момент расположены частицы, прошедшие в разное время через одну и ту же точку пространства. При установившемся движении линии отмеченных частиц совпадают с траекториями и линиями тока.

Если в движущейся жидкости взять достаточно малый замкнутый контур и через все его точки провести линии тока, то образуется трубчатая поверхность, которая называется *трубкой тока* (рис. 3.3). Жидкость, протекающая внутри трубки тока, называется *элементарной струйкой* (между сечениями 1–1 и 2–2).

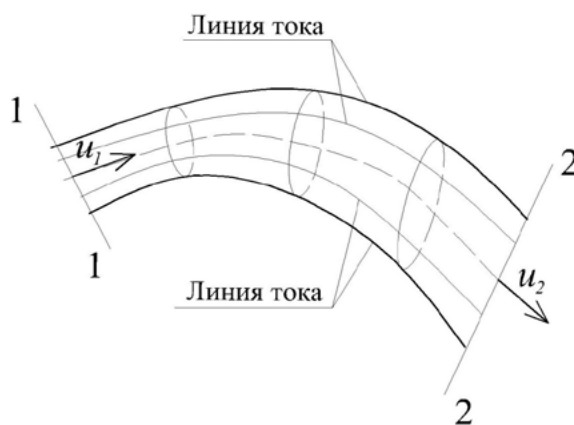


Рис. 3.3. Элементарная струйка

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)